

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АКРОМИАЛЬНО-КЛЮЧИЧНОГО СОЧЛЕНЕНИЯ НОВЫМ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

Ж. М. Молдакулов ^{1*}, М. К. Халходжаев ², С. С. Альходжаев ¹, Е. Н. Набиев ³,
А. Т. Хамитжанов ¹

¹ Казахстанско-Российский медицинский университет, Казахстан, Алматы

² Южно-Казахстанская медицинская академия, Казахстан, Шымкент

³ Казахский Национальный медицинский университет имени С. Д. Асфендиярова, Казахстан, Алматы

**Корреспондирующий автор*

Аннотация

Введение. В процессе разработки имплантов для остеосинтеза специалисты все чаще используют математическое (компьютерное) моделирование с целью биомеханического обоснования преимуществ, прочностных характеристик и надежности имплантов при использовании в практической работе. Математическое моделирование позволяет получить максимальную полезную информацию для обеспечения механической совместимости имплантата.

Цель исследования. Изучить напряженно-деформированное состояние в биомеханических системах: «ключица – крючкообразная пластина» и «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента» методом конечных результатов с использованием программы КОМПАС-3D (APM FEM), Autodesk Inventor PR.

Материалы и методы. Представлены результаты математического обоснования восстановления акромиально-ключичного сочленения новым комбинированным способом (Патент на изобретение РК № 36128 от 03.03.2023 г. «Комбинированный способ восстановления акромиально-ключичного сочленения»).

Результаты. Методом конечных результатов с использованием программы КОМПАС-3D (APM FEM), Autodesk Inventor PR проведен математический анализ напряженно-деформированного состояния, возникающих при воздействии чрезмерных нагрузок в биомеханических системах: «ключица – крючкообразная пластина» и «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента». Для реализации задачи была разработана усредненная виртуальная стереолитографическая 3D компьютерная модель ключицы и лопатки (STL-модель).

В результате конечно-элементного анализа установлено, что новый комбинированный способ позволяет снизить эквивалентные напряжения с 8,16 до 4,19 МПа, уменьшить смещение крючка с 1,5 до 0,03 мм и увеличить минимальный коэффициент запаса прочности с 1,74 до 1,93.

Выводы. Результаты проведенных биомеханических исследований позволили сделать вывод о следующих преимуществах нового способа восстановления акромиально-ключичного сочленения перед классическим методом шинирования акромиально-ключичного сустава с помощью крючкообразной пластины: снижение напряжения в местах взаимодействия крючка крючкообразной пластины с акромиальным отростком лопатки в 1,9 раз; уменьшение смещения крючка пластины в 50 раз; повышение запаса прочности на 1 мин.

Ключевые слова: биомеханика, математическое обоснование, метод конечных элементов (МКЭ), ключица, лопатки, крючкообразная пластина.

Введение

В последние годы при разработке и оценке эффективности имплантов для остеосинтеза всё более широкое применение находит математическое моделирование, позволяющее проводить биомеханическое обоснование прочностных характеристик, надёжности и механической совместимости импланта с костной тканью [1]. Использование расчётных методов особенно актуально на этапах доклинической оценки, когда требуется прогнозирование поведения системы «имплант-кость» при действии функциональных нагрузок.

Известно, что перераспределение силовых потоков в костной ткани оказывает существенное влияние на процессы её ремоделирования. Исключение отдельных участков кости из передачи нагрузки может приводить к развитию резорбции, тогда как локальная концентрация механических напряжений в зоне контакта импланта с костью (явление стресс-шилдинга) ассоциируется с риском остеолита и повреждения костных структур [2-4]. В этой связи оптимизация конструкции имплантов и способов их фиксации с целью обеспечения более равномерного распределения нагрузок является важной задачей современной ортопедии и травматологии.

Одним из наиболее распространённых и эффективных численных методов анализа напряжённо-деформированного состояния сложных биомеханических систем является метод конечных элементов (далее – МКЭ), позволяющий учитывать геометрию конструкции, физико-механические свойства материалов и условия нагружения [5; 6]. Применение МКЭ широко используется при анализе систем «имплант-кость» и зарекомендовало себя как надёжный инструмент при разработке и оптимизации конструкций для остеосинтеза [7].

В клинической практике при повреждениях акромиально-ключичного сочленения широко применяется фиксация крючкообразной пластиной. Несмотря на обеспечение удовлетворительной стабильности, данный метод может сопровождаться развитием осложнений, связанных с локальной перегрузкой акромиального отростка лопатки и подакромиальных структур [8; 9]. Указанные осложнения обусловлены концентрацией механических напряжений

в зоне контакта крючка пластины с костными структурами.

В этой связи представляет интерес применение комбинированных способов стабилизации акромиально-ключичного сочленения, направленных на перераспределение нагрузок между элементами конструкции и снижение пиковых напряжений в критических зонах системы «имплант-кость» [10-12]. Биомеханическое обоснование таких подходов с использованием методов численного моделирования позволяет объективно оценить их потенциальные преимущества по сравнению с традиционными методами фиксации.

Цель исследования. Изучить напряженно-деформированное состояния (далее – НДС) в биомеханических системах: «ключица – крючкообразная пластина» и «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента» методом конечных результатов (далее – МКЭ) с использованием программы КОМПАС-3D (APR FEM), Autodesk Inventor PR.

Материалы и методы

Настоящее исследование выполнено в формате оригинального биомеханического *in silico* исследования с использованием метода конечных элементов.

Объектом исследования являлись две биомеханические системы: «ключица – крючкообразная пластина» (классический вариант фиксации) и «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента» (новый комбинированный способ).

Новый способ восстановления акромиально-ключичного сочленения защищен патентом Республики Казахстан № 36128 от 03.03.2023 г. «Комбинированный способ восстановления акромиально-ключичного сочленения» [13].

Для проведения математического моделирования была создана усредненная трехмерная анатомическая модель ключицы и лопатки. Геометрия костных структур формировалась на основании анализа рентгенографических изображений, данных компьютерной томографии, анатомических атласов и специализированной литературы. На первом этапе была получена стереолитографическая модель (далее – STL-модель), которая затем преобразовывалась в твердотельную модель с использованием про-

граммных комплексов КОМПАС-3D, Autodesk Inventor Professional и InVesalius. Геометрические модели крючкообразной пластины, винтов и лавсановой ленты были созданы в соответствии с их реальными конструктивными и размерными характеристиками.

В расчетах использовались линейно-упругие изотропные модели материалов. Для кортикальной и губчатой костной ткани, титанового сплава пластины ВТ6 и лавсановой ленты были заданы значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, принятые на основании опубликованных литературных данных. Такой подход является общепринятым в биомеханических

исследованиях с применением метода конечных элементов и обеспечивает корректность сравнительного анализа.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния выполнялось методом конечных элементов с использованием программ КОМПАС-3D (APR FEM) и Autodesk Inventor Professional.

В расчётах использовались физико-механические характеристики костной ткани и материалов имплантов, принятые на основании данных опубликованных источников [10; 11]. Значения используемых параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физические и механические показатели в расчетах напряженно-деформированного состояния

Материал	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Кортикальная кость	15000	0,3
Губчатая кость	1000	0,3
Пластина -ВТ6	110000	0,3
Лавсановая лента	9900 – 10600	0,3

Источник: составлено авторами

Дискретизация моделей осуществлялась с применением линейных тетраэдрических конечных элементов. Биомеханическая система «ключица – крючкообразная пластина» (первый вариант) была представлена конечно-элементной моделью, включающей 30 695 элементов и 49 951 узел. Система «ключица – крючкообразная

пластина – лавсановая лента» (второй вариант) состояла из 35 653 конечных элементов и 58 513 узлов (рисунок 1). Контактное взаимодействие между костными структурами и элементами фиксации моделировалось как жёсткое, без учёта скольжения.

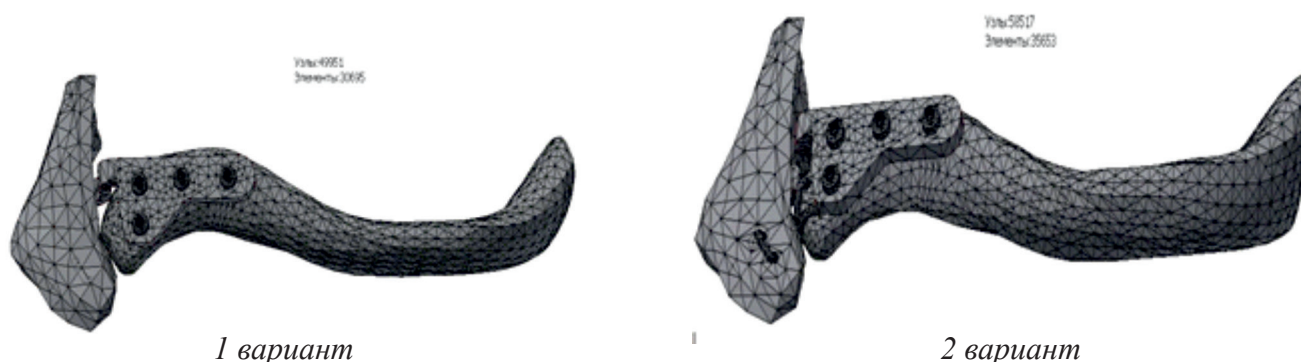


Рисунок 1. Конечно-элементная сетка

Источник: составлено авторами

В качестве нагрузки было принято тянущее вверх усилие на медиальную часть ключицы в месте прикрепления грудино-ключично-

сосцевидной мышцы. С учётом данных исследований [11], силу раскладывали на 3 составляющие: $X = -1,5N$, $Y = -14,2N$, $Z = -4,2N$ (рисунок 2).

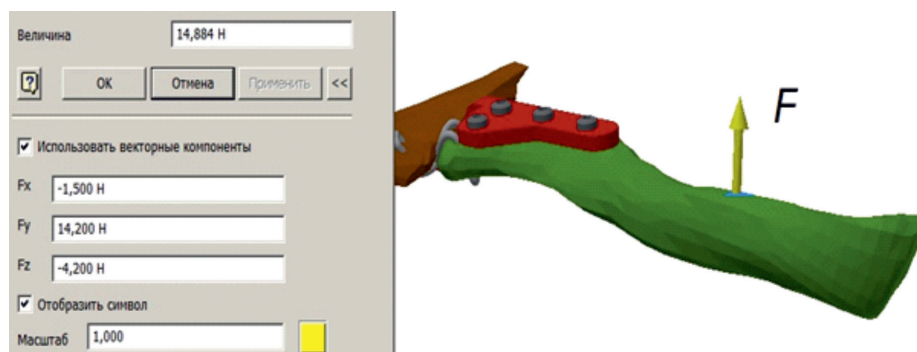


Рисунок 2. Приложение нагрузки

Источник: составлено авторами

Для оценки эффективности и биомеханических преимуществ нового комбинированного способа восстановления акромиально-ключичного сочленения анализировались максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в зоне контакта крючка пластины с акромиальным отростком лопатки, максимальное линейное перемещение конца крючка пластины, а также минимальный коэффициент запаса проч-

ности элементов исследуемых систем. Поскольку исследование носило расчетно-модельный характер, результаты представлялись в виде абсолютных и сравнительных значений без применения методов биостатистического анализа.

Результаты

На рисунке 3 представлена схема нового комбинированного способа восстановления акромиально-ключичного сочленения.

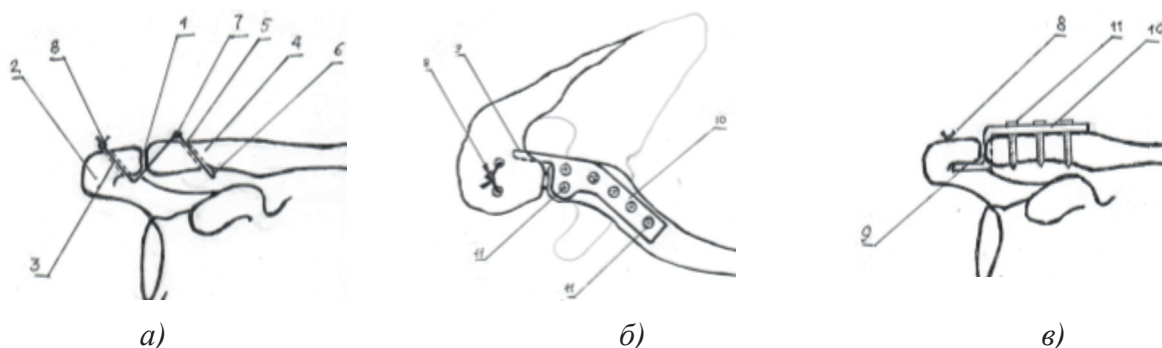


Рисунок 3. Новый способ восстановления акромиально-ключичного сустава

а – формирования из лавсана новой акромиально-ключичной связки;
б, в – фиксация акромиально-ключичного сустава крючкообразной пластиной

Источник: составлено авторами

На рисунке 4 показана расчётная модель биомеханической системы «ключица – крючко-

образная пластина» и «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента».



Рисунок 4. Общий вид исследуемых систем

а) «ключица – крючкообразная пластина» (1 вариант);
б) «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента» (2 вариант).
1- ключица, 2 – акромиальный отросток лопатки, 3 – крючкообразная пластина, 4 – винты,
5 – лавсановая лента.

Источник: составлено авторами

Проведённые расчёты напряжённо-деформированного состояния показали различия в распределении эквивалентных напряжений в исследуемых биомеханических системах.

При воздействии расчётной нагрузки максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в зоне контакта крючка пластины с акромиальным отростком лопатки в системе

«ключица – крючкообразная пластина» составили 8,16 МПа, тогда как в системе «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента» данный показатель снижался до 4,19 МПа (рисунок 5).

Распределение эквивалентных напряжений в элементах конструкции для обоих вариантов фиксации представлено на рисунках 5-7.

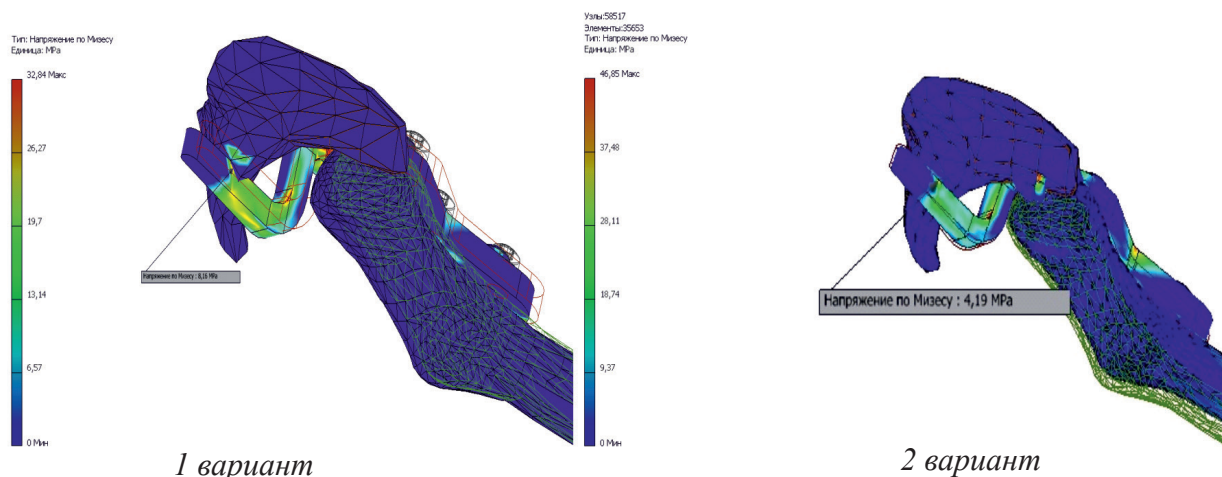


Рисунок 5. Максимальное напряжение под крючком по Мизесу, МПа

Источник: составлено авторами

Анализ линейных перемещений показал, что максимальное смещение конца крючка пла-

стины в первом варианте составило 1,5 мм, во втором варианте – 0,03 мм (рисунок 6).

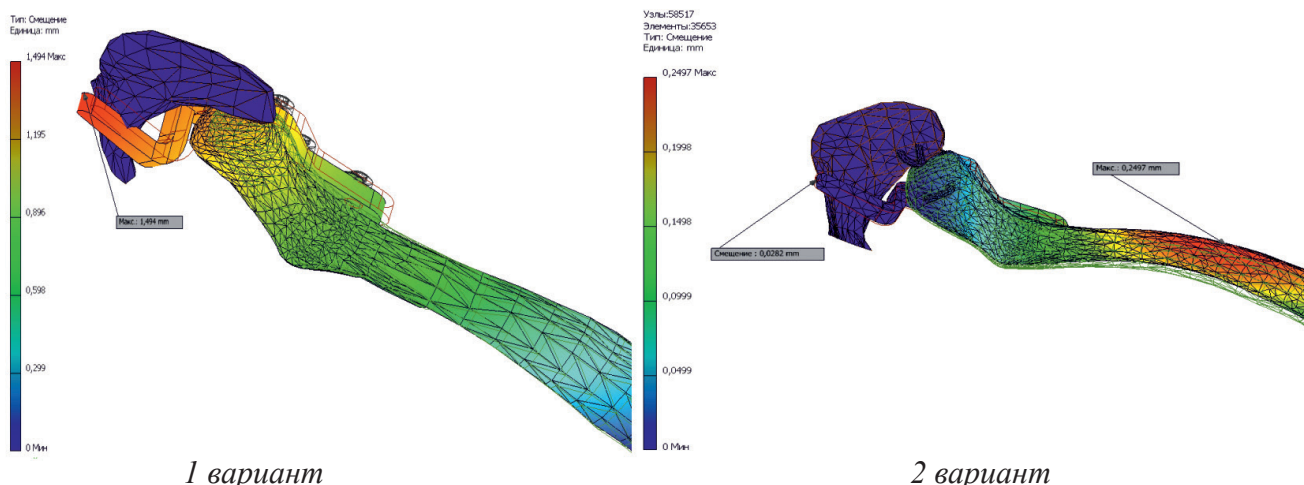


Рисунок 6. Смещение элементов системы: максимальное линейное перемещение конца крючка, мм.

Источник: составлено авторами

Минимальный коэффициент запаса прочности биомеханической системы «ключица – крючкообразная пластина» составил 1,74,

в то время как для системы «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента» данный показатель увеличивался до 1,93 (рисунок 7).

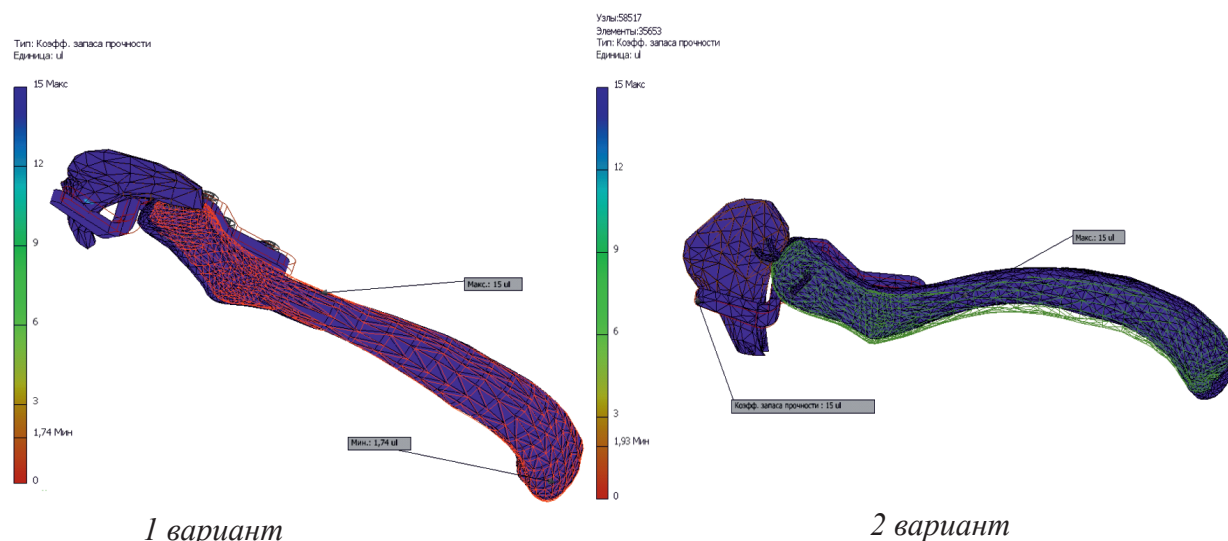


Рисунок 7. Коэффициент запаса прочности систем

Источник: составлено авторами

Сравнительные результаты расчетов напряженно-деформированного состояния для обоих вариантов представлены в Таблице 2. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния показал, что применение комбинированного способа фиксации сопровождается снижением максимальных эквивалентных напряжений в зоне контакта крючка пластины с акромиальным отростком лопатки в 1,9 раза по

сравнению с классическим вариантом фиксации.

Анализ линейных перемещений выявил уменьшение максимального смещения крючка пластины с 1,5 мм до 0,03 мм, что соответствует снижению более чем в 50 раз. Минимальный коэффициент запаса прочности для классического варианта фиксации составил 1,74, тогда как при использовании комбинированного способа он увеличивался до 1,93.

Таблица 2. Сравнительные результаты расчетов НДС

П/П №	Показатели	1 вариант	2 вариант
1	Максимальное эквивалентное напряжение под крючком по Мизесу, МПа	8,16 МПа	4,19 МПа
2	Максимальное линейное перемещение конца крючка, мм	1,5 мм	0,03 мм
3	Минимальный коэффициент запаса прочности	1,74	1,93

Источник: составлено авторами

Сравнительные результаты расчетов биомеханических исследований позволяют сделать вывод о преимуществе биомеханической системы «ключица – крючкообразная пластина – лавсановая лента» с использованием нового комбинированного способа восстановления акромиально-ключичного сочленения перед системой «ключица – крючкообразная пластина», когда используется только крючкообразная пластина.

Обсуждение

Проведённое *in silico* исследование позволило оценить влияние комбинированного способа восстановления акромиально-ключичного сочленения на распределение напряжён-

но-деформированного состояния по сравнению с классическим вариантом фиксации крючкообразной пластиной. Применение метода конечных элементов для анализа биомеханических систем «имплант–кость» является общепринятым и широко используется при разработке и оптимизации конструкций для остеосинтеза в травматологии и ортопедии [5-7; 14].

Полученные результаты показали, что включение лавсановой ленты в систему фиксации способствует более равномерному перераспределению нагрузок между элементами конструкции и костными структурами. Снижение максимальных эквивалентных напряжений

в зоне контакта крючка пластины с акромиальным отростком лопатки указывает на уменьшение локальной концентрации механических напряжений. Аналогичные выводы о неблагоприятной роли локальных перегрузок в зоне контакта импланта с костью и их связи с развитием остеолита и подакромиальных осложнений представлены в ряде экспериментальных и клинических исследований [2-4; 8].

Значительное уменьшение линейного смещения конца крючка пластины при использовании комбинированного способа свидетельствует о повышении стабильности фиксации акромиально-ключичного сочленения. Повышенная стабильность конструкции рассматривается как один из ключевых биомеханических факторов, обеспечивающих сохранение репозиции в послеоперационном периоде и снижение риска вторичных смещений акромиального конца ключицы, что согласуется с данными клинических и биомеханических исследований, посвящённых лечению повреждений акромиально-ключичного сустава [9-11; 15].

Увеличение минимального коэффициента запаса прочности при применении комбинированного способа отражает повышение общей механической надёжности биомеханической системы при воздействии расчётной нагрузки. Повышение запаса прочности конструкции потенциально расширяет допустимый диапазон функциональных нагрузок в раннем послеоперационном периоде и может способствовать более безопасной функциональной реабилитации пациентов после восстановления акромиально-ключичного сочленения [6;12].

Следует отметить, что полученные результаты согласуются с современными исследованиями, в которых подчёркивается целесообразность применения комбинированных методов стабилизации акромиально-ключичного сочленения, направленных на перераспределение нагрузки и снижение локальных напряжений в зоне контакта импланта с костью [10-12; 14; 15]. Вместе с тем представленное исследование носит модельный характер и не заменяет клинические данные. Полученные выводы следует рассматривать как биомеханическое обоснование перспективности предложенного способа, требующее дальнейшей экспериментальной и клинической валидации.

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о биомеханических преимуществах нового комбинированного способа восстановления акромиально-ключичного сочленения по сравнению с классическим методом фиксации крючкообразной пластиной. Снижение уровня напряжений и линейных перемещений, а также увеличение коэффициента запаса прочности указывают на повышение устойчивости конструкции к действию расчётных нагрузок.

Результаты проведённого исследования могут рассматриваться как биомеханическое обоснование целесообразности дальнейшего экспериментального и клинического изучения предложенного способа восстановления акромиально-ключичного сочленения.

Список источников

1. Brunette D. M., Tengvall P., Textor M., Thomsen P. Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications. – Berlin: Springer, 2001. – 1020 p.
2. Evans F. G. Mechanical properties of bone. – Springfield: Charles C Thomas, 1973. – 322 p.
3. Huiskes R., Weinans H., van Rietbergen B. The relationship between stress shielding and bone resorption around total hip stems // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. – 1992. – № 274. – P. 124-134. – DOI: 10.1097/00003086-199201000-00014.
4. Karlov A. V., Shakhov V. P. Systems of external fixation and regulatory mechanisms of optimal biomechanics. – Tomsk: STT, 2001. – 480 p.
5. Segerlind L. J. Applied finite element analysis. – New York: Wiley, 1976. – 422 p.
6. Viceconti M., Olsen S., Nolte L. P., Burton K. Extracting clinically relevant data from finite element models // *Clinical Biomechanics*. – 2005. – Vol. 20(5). – P. 451-454. – DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2005.01.010.
7. Dobbe J. G. G., Strackee S. D., Schreurs A. W., et al. Finite element analysis of orthopedic fixation techniques // *Medical Engineering & Physics*. – 2011. – Vol. 33(8). – P. 1006-1013.
8. Lin H. Y., Wong P. K., Ho W. P., Chou W. Y. Subacromial complications after hook plate fixation // *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. – 2014. – Vol. 9. – Article No. 6. – DOI:

10.1186/1749-799X-9-6.

9. Kienast B., Thietje R., Queitsch C., et al. Mid-term results after operative treatment of acromioclavicular joint dislocations using hook plate // *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. – 2011. – Vol. 37. – P. 173-179. – DOI: 10.1186/2047-783x-16-2-52.

10. Mazzocca A. D., Santangelo S. A., Johnson S. T., et al. A biomechanical evaluation of acromioclavicular joint reconstructions // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2006. – Vol. 34(2). – P. 236-246. – DOI: 10.1177/0363546505281795.

11. Beitzel K., Obopilwe E., Apostolakis J., et al. Biomechanical properties of acromioclavicular joint stabilization techniques // *The American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41(6). – P. 1387-1394. – DOI: 10.1007/s00167-011-1828-y.

12. Cronskaer M., Rasmussen J., Tinnsten M. Combined finite element and musculoskeletal investigation of clavicle fixation // *Computational Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. – 2015. – Vol. 18(7). – P. 740-748. – DOI: 10.1080/10255842.2013.845175.

13. Набиев Е. Н., Халходжаев М. К. Патент Республики Казахстан № 36128. Комбинированный способ восстановления акромиально-ключичного сочленения. – Опубликовано 03.03.2023.

14. Orazaliev K. M., Dosmailov B. S., Gorbunov B. N., et al. Biomechanical substantiation of osteosynthesis of trochanteric femur fractures with a new device // *Pharmacy of Kazakhstan*. – 2024. – № 4. – P. 13-24. – DOI: 10.53511/pharmkaz.2024.85.81.002

15. Jensen G., Millett P. J., Tahal D. S., Aliberti G. M. Acromioclavicular joint injuries: indications and treatment options // *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. – 2014. – Vol. 23. – P. 71-78. – DOI: 10.1016/j.jse.2010.10.030.

References

1. Brunette, D. M., Tengvall, P., Textor, M., & Thomsen, P. (2001). *Titanium in medicine: Material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications*. Springer.

2. Evans, F. G. (1973). *Mechanical properties of bone*. Charles C Thomas.

3. Huiskes, R., Weinans, H., & van Rietbergen, B. (1992). The relationship between stress shielding and bone resorption around total hip stems. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (274),

124-134. DOI: <https://doi.org/10.1097/00003086-199201000-00014>.

4. Karlov, A. V., & Shakhov, V. P. (2001). Systems of external fixation and regulatory mechanisms of optimal biomechanics. STT.

5. Segerlind, L. J. (1976). *Applied finite element analysis*. Wiley.

6. Viceconti, M., Olsen, S., Nolte, L. P., & Burton, K. (2005). Extracting clinically relevant data from finite element models. *Clinical Biomechanics*, 20(5), 451-454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.01.010>

7. Dobbe, J. G. G., Strackee, S. D., Schreurs, A. W., & others. (2011). Finite element analysis of orthopedic fixation techniques. *Medical Engineering & Physics*, 33(8), 1006-1013.

8. Lin, H. Y., Wong, P. K., Ho, W. P., & Chou, W. Y. (2014). Subacromial complications after hook plate fixation. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 9, 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/1749-799X-9-6>.

9. Kienast, B., Thietje, R., Queitsch, C., & others. (2011). Mid-term results after operative treatment of acromioclavicular joint dislocations using hook plate. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 37, 173-179. DOI: 10.1186/2047-783x-16-2-52.

10. Mazzocca, A. D., Santangelo, S. A., Johnson, S. T., & others. (2006). A biomechanical evaluation of acromioclavicular joint reconstructions. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(2), 236-246. DOI: 10.1177/0363546505281795.

11. Beitzel, K., Obopilwe, E., Apostolakis, J., & others. (2013). Biomechanical properties of acromioclavicular joint stabilization techniques. *The American Journal of Sports Medicine*, 41(6), 1387-1394. DOI: 10.1007/s00167-011-1828-y.

12. Cronskaer, M., Rasmussen, J., & Tinnsten, M. (2015). Combined finite element and musculoskeletal investigation of clavicle fixation. *Computational Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 18(7), 740-748. DOI: 10.1080/10255842.2013.845175.

13. Nabiev, E. N., & Khalkhodzhaev, M. K. (2023). *Kombinirovannyi sposob vosstanovleniia akromial'no-kliuchichnogo sochleneniia*. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 36128. (In Russian).

14. Orazaliev, K. M., Dosmailov, B. S., Gorbunov, B. N., & others. (2024). *Biomechanicheskoe obos-*

novanie osteosinteza vertel'nykh perelomov bedrennoi kosti s primeneniem novogo ustroystva [Biomechanical substantiation of osteosynthesis of trochanteric femur fractures using a new device]. Pharmacy of Kazakhstan, (4), 13–24. <https://doi.org/10.53511/pharmkaz.2024.85.81.002> (In Russian).

15. Jensen, G., Millett, P. J., Tahal, D. S., & Aliberti, G. M. (2014). Acromioclavicular joint injuries: Indications and treatment options. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 23(Suppl.), 71-78. DOI: 10.1016/j.jse.2010.10.030.

АКРОМИОН-БҰҒАНАЛЫҚ ҚОСЫНДЫНЫ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУДІҢ ЖАҢА КОМБИНАЦИЯЛАНҒАН ӘДІСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ ТҮРҒЫДА НЕГІЗДЕУ

Ж. М. Молдакулов ^{1*}, М. К. Халходжаев ², С. С. Альходжаев ¹, Е. Н. Набиев ³,
А. Т. Хамитжанов ¹

¹ Қазақстан-Ресей медициналық университеті, Қазақстан, Алматы

² Оңтүстік Қазақстан медициналық академиясы, Қазақстан, Шымкент

³ С. Д. Асфендияров атындағы Қазақ Ұлттық медициналық университеті, Қазақстан, Алматы

*Корреспондент автор

Аңдатпа

Кіріспе. Остеосинтезге арналған импланттарды жасау кезінде мамандар практикалық жұмыста қолданған кезде импланттардың артықшылықтарын, беріктік сипаттамаларын және сенімділігін биомеханикалық негіздеу мақсатында математикалық (компьютерлік) моделдеуді көбірек пайдаланады. Математикалық моделдеу импланттың механикалық үйлесімділігін қамтамасыз ету үшін максималды пайдалы ақпаратты алуға мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты. КОМПАС-3D (APR FEM) бағдарламасын және Autodesk Inventor PR бағдарламасын пайдалана отырып, шекті нәтижелер әдісін (FEM) қолдана отырып, «бұғана – ілмек тәрізді пластина» және «бұғана – ілмек тәрізді пластина – лавсан лентасы» биомеханикалық жүйелеріндегі кернеу-деформация күйін (SSS) зерттеу.

Материалдар мен әдістер. Мақалада акромион-бұғаналық буынды жаңа комбинациялық әдісті қолдану арқылы қалпына келтіру әдісі («Акромион-бұғаналық буынды қалпына келтірудің жаңа комбинациялық әдісі» 03.03.2023 ж. № 36128 Қазақстан Республикасының өнертабысқа патенті) сипатталған.

Нәтижелер. КОМПАС-3D бағдарламасын (APR FEM), Autodesk Inventor PR көмегімен соңғы элементтер әдісін пайдалана отырып, «бұғана – ілмек тәрізді пластина» және «бұғана – ілмек тәрізді пластина – лавсан лентасы» биомеханикалық жүйелердегі кернеулі-деформациялық күйдің жағдайына математикалық талдау жүргізілді. Тапсырманы жүзеге асыру үшін бұғана мен жауырынның орташаланған виртуалды стереолитографиялық 3D компьютерлік моделі (STL модель) әзірленді.

Ақырлы-элементтік талдау нәтижесінде жаңа біріктірілген әдіс эквивалентті кернеулерді 8,16-дан 4,19 МПа-ға дейін төмендетуге, ілмектің жылжуын 1,5-тен 0,03 мм-ге дейін төмендетуге және қауіпсіздік шегінің минималды коэффициентін 1,74-тен 1,93-ке дейін арттыруға мүмкіндік беретіні анықталды.

Қорытынды. Биомеханикалық зерттеулердің нәтижелері акромион-бұғаналық буынды жаңа комбинациялық әдісті қолдану арқылы қалпына келтіру әдісі осы буынды ілмек тәрізді пластина көмегімен бекітудің классикалық әдісіне қарағанда келесі артықшылықтары туралы қорытынды жасауға мүмкіндік берді: ілмектің ілгегі орналасқан жерде кернеу 1,9 есе азаяды; пластина ілмегінің ығысуы 50 есе азаяды; беріктік коэффициент 1 мин-ке артады.

Түйін сөздер: биомеханика, математикалық негіздеу, соңғы элементтер әдісі, бұғана, жауырын, ілмек тәрізді пластина.

MATHEMATICAL JUSTIFICATION OF RESTORATION OF THE ACROMIO-CLAVICULAR JOINT BY A NEW COMBINED METHOD

**Zh. M. Moldakulov¹*, M. Khalkhojayev², S. Alkhojaev¹, E. N. Nabiye³,
A. Khamitzhanov¹**

¹ Kazakh-Russian Medical University, Kazakhstan, Almaty

² South Kazakhstan Medical Academy, Kazakhstan, Shymkent

³ S. D. Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Kazakhstan, Almaty

**Corresponding author*

Abstract

Introduction. In the development of implants for osteosynthesis, specialists increasingly use mathematical (computer) modeling to biomechanically justify the advantages, strength characteristics, and reliability of implants in practical applications. Mathematical modeling enables the extraction of the maximum useful information to ensure the mechanical compatibility of the implant.

Objective. To study the stress-strain state in the biomechanical systems «clavicle – hook-shaped plate» and «clavicle – hook-shaped plate – lavsan tape» using the finite-element method using the KOMPAS-3D (APM FEM) program and Autodesk Inventor PR. Materials and methods. The article presents the results of the mathematical justification of the restoration of the acromioclavicular joint by a new combined method (Patent for invention RK No. 36128 dated 03.03.2023 «Combined method for restoring the acromioclavicular joint»).

Results. The finite-element method using the KOMPAS-3D (APM FEM) program and Autodesk Inventor PR was used to perform a mathematical analysis of the stress-strain state under the influence of excessive loads in the biomechanical systems «clavicle – hook plate» and «clavicle – hook plate – lavsan tape». An averaged virtual stereolithographic 3D computer model of the clavicle and scapula (STL model) was developed to implement the task.

The finite element analysis showed that the new combined method reduces equivalent stresses from 8.16 to 4.19 Mpa, decreases the displacement of the hook from 1.5 to 0.03 mm, and increases the minimum safety margin from 1.74 to 1.93.

Conclusion. The conducted biomechanical studies revealed the advantages of the new method for restoring the acromioclavicular joint over the classical method of splinting using a hook-shaped plate. The new method reduces stress at the points of interaction between the hook of the hook-shaped plate and the acromial process of the scapula by 1.9 times, decreases the displacement of the hook by 50 times, and increases the safety margin for 1 min.

Keywords: *biomechanics, mathematical justification, finite element method, clavicle, scapula, hook-shaped plate.*

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ

Молдакулов Жұмахан Мукашевич – медицина ғылымдарының кандидаты, «Қазақстан-Ресей медицина университеті» МЕМБМ травматология, ортопедия кафедрасының доценты, Қазақстан, Алматы; e-mail: 9193md@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1532-8151>.

Халхождаев Махмуджан Камилжанович – Оңтүстік-Қазақстан медициналық академиясы травматология және ортопедия кафедрасының ассистенті, Қазақстан, Шымкент; e-mail: traumatolog_91@mail.ru; ORCID 0000-0002-1627-8328.

Әлхаджаев Саруарбек Сұлтанбекұлы – медицина ғылымдарының кандидаты, «С. Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті» КЕАҚ травматология және ортопедия кафедрасының қауымдастырған профессоры, Қазақстан, Алматы; e-mail: saruar_1970@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9221-8872>.

Нәбиев Ергали Нұғманович – медицина ғылымдарының докторы, «С. Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті» КЕАҚ травматология және ортопедия кафедрасының профессоры, Қазақстан, Алматы; e-mail: 9193md@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1532-8151>.

Хамитжанов Айбек Тұрсынұлы – «Қазақстан-Ресей медицина университеті» МEBBM травматология ортопедия кафедрасының аға оқытушысы, Қазақстан, Алматы; e-mail: alibek_cqkb@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8881-9493>.

ОБ АВТОРАХ

Молдакулов Жумахан Мукашевич – кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии и ортопедии НУО «Казakhstanско-Российский медицинский университет», Казахстан, Алматы; e-mail: Moldakulov66@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0963-2332>.

Халхождаев Махмуджан Камилжанович – ассистент кафедры травматологии и ортопедии Южно-Казахстанской медицинской академии, Казахстан, Шымкент; e-mail: traumatolog_91@mail.ru; телефон: + 7 702 093 40 10; ORCID: 0000-0002-1627-8328.

Альходжаев Саруарбек Султанбекович – кандидат медицинских наук, ассистент-профессор кафедры травматологии и ортопедии, НАО «Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова», Казахстан, Алматы; e-mail: saruar_1970@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9221-8872>.

Набиев Ергали Нұғманович – доктор медицинских наук, профессор кафедры травматологии и ортопедии НАО «Казахский Национальный медицинский университет им. С. Д. Асфендиярова», Казахстан, Алматы; e-mail: 9193md@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1532-8151>.

Хамитжанов Айбек Тұрсынович – старший преподаватель кафедры травматологии, ортопедии и ВПХ, Казахстанско-российский медицинский университет, Казахстан, Алматы; e-mail: alibek_cqkb@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8881-9493>.

ABOUT AUTHORS

Moldakulov Zhumakhan – Associate Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics of the NEI «Kazakh-Russian Medical University», Kazakhstan, Almaty; e-mail: Moldakulov66@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0963-2332>.

Mahmujan Halkhodzhaev – PhD Student, South Kazakhstan Medical Academy, Kazakhstan, Shymkent; e-mail: traumatolog_91@mail.ru; ORCID: 0000-0002-1627-8328.

Alkhojaev Saruarbek – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor at the Department of Traumatology and Orthopedics, Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: saruar_1970@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9221-8872>.

Nabiyev Yergali – Professor at the Department of Traumatology and Orthopedics, Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: 9193md@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1532-8151>.

Khamitshanov Alibek – Senior lector at the Department of Traumatology, Orthopedics and Military Surgery, Kazakh-Russian Medical University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: alibek_cqkb@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8881-9493>.

Вклад авторов:

Разработка концепции: Халхождаев М.К., Набиев Е.Н.; Исполнение: Хамитжанов А.Т., Жармухамбетов Е.А.; Обработка результатов: Молдакулов Ж.М., Жармухамбетов Е.А.; Научная интерпретация результатов: Альходжаев С.С., Набиев Е.Н.; Написание статьи: Альходжаев С.С., Набиев Е.Н., Молдакулов Ж.М.

Заявляем, что данный материал ранее не публиковался и не находится на рассмотрении в других издательствах.

Финансирование. *Внешнее финансирование для данного исследования не предоставлялось.*

Конфликт интересов. *Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, влияющего на научную добросовестность исследования.*

Все авторы прочитали и одобрили окончательную версию рукописи и согласны нести ответственность за все аспекты работы.

Статья поступила: 24.10.2025 г.

Принята к публикации: 12.12.2025 г.